

# 风水两相作用和人类活动对无定河粗泥沙输沙量的影响

颜明, 孙莉英, 闫云霞, 许炯心

(中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 风沙活动、降雨和人类活动是干旱—湿润过渡区影响粗泥沙( $d > 0.05$  mm)入黄的几个重要因素。粗泥沙输沙量的变化取决于全沙输沙量和粗泥沙在全沙中所占的比例。基于悬移质输沙量和泥沙粒径构成、降雨量、沙尘暴日数和水土保持面积等数据,分析了粗泥沙输沙量与影响因素之间的关系,利用 ArcGIS 和 SPSS 软件定量分析了影响无定河流域代表自然过程的风水两相作用和人类活动对粗泥沙输沙量的影响,并通过回归分析确定了不同影响因素对全沙输沙量和粗泥沙比例的贡献。结果表明,影响全沙输沙量的主要因素是降雨量和水土保持措施,而影响粗泥沙比例的是风沙活动和水土保持措施。利用二元回归分析确定了各因素的贡献比例,认为降雨量的减少和人类活动对全沙量减少的贡献相当,人类活动对粗泥沙比例降低的贡献高于风沙活动的作用。

**关键词:** 无定河; 风水两相变化; 人类活动; 粗泥沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0089-04

中图分类号: S157.1

## Effects of Interactive Fluvial and Aeolian Processes Along with Human Activities on Coarse Sediment Yield in Wudinghe River Basin

YAN Ming, SUN Li-ying, YAN Yun-xia, XU Jiong-xin

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geography Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Aeolian activities, precipitation and human activities are the main factors affecting the delivery of the coarse sediments ( $> 0.05$  mm) from the transition zones of arid and humid areas into the Yellow River in Northern China. The variations of coarse sediment transportation are determined by the total sediment yield and the percentage of coarse sediment. Based field collected suspended sediment yield, grain size of suspended sediment, precipitation, events of sand-dust storms and areas of soil and water conservation measures, the relationship between coarse sediment yield and its influencing factors were investigated in the basin of Wudinghe River. Both total sediment yield and proportion of coarse sediment in the total yield were used to describe the dynamics of coarse sediment transportation. Effects of physical process, referred to as the interactive fluvial—aeolian process, and human activities on the generation of the coarse sediment were studied, and the relationships between the two parameters and the influencing factors were investigated using geographic information system (ArcGIS) and statistical software (SPSS 12.0). The contribution of fluvial—aeolian changes and human activities to coarse sediment ratio and the total suspended sediment yield was analyzed using multivariate regression. The results showed that total suspended sediment yield correlated closely with the amount of precipitation and the area of soil and water conservation measures. The coarse sediment ratio was linked closely with aeolian factors and the area of soil and water conservation measures. It was also found that the contribution of precipitation to total suspended sediment yield was almost equal to that of human activities, while the contribution of human activities to the reduction of coarse sediment ratio was higher than that of aeolian activities.

**Keywords:** Wudinghe River basin; fluvial—aeolian processes; human activities; coarse sediments

收稿日期: 2011-12-09

修回日期: 2012-02-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄河流域水文地貌对人类活动的响应”(Y1C10090AE); 国家重点基础科学(973)研究发展计划项目(2011CB403305)

作者简介: 颜明(1977—), 四川省资中县人, 博士, 助理研究员, 主要从事河流地貌与环境研究。E-mail: yanming7731@163.com。

风水两相作用是造成黄河中游高强度侵蚀产沙频发的主要原因<sup>[1-2]</sup>。近年,黄河中游产生的泥沙大幅减少,尤其是 $>0.05$  mm 粗泥沙的大幅减少,显著减轻了黄河下游河道的抬升的压力<sup>[3-4]</sup>。无定河流域是黄河中游多沙粗沙区的一条重要支流,近几十年来,无定河流域粗泥沙输沙量出现了明显的下降,在减轻黄河下游粗泥沙沉积的压力上具有重要贡献<sup>[5]</sup>。前人对此变化已经从降雨的减少和水土保持措施两方面做了研究<sup>[6-10]</sup>,但由于该流域处于风沙区,流域内覆盖有大面积的半固定沙丘,风沙对于流域产沙尤其是粗沙输沙量和粗泥沙占全沙的比例(以下简称粗沙比)两个方面来探讨引泥沙的变化还未受到重视。本研究综合了降雨、风沙和人类活动变化等几个影响要素,以全沙输沙量和粗沙比作为粗泥沙输沙量的两个指标,探讨了影响因素与粗泥沙之间的关系和影响程度。研究结果不仅对于阐明黄河中游粗泥沙的产沙机制具有重要意义,而且对粗泥沙来源区的治理,降低下游河道粗泥沙沉积压力具有现实意义。

## 1 研究区概况

无定河流域地处陕北黄土高原和鄂尔多斯干燥剥蚀风沙高原的过渡地带。以长城为界分为南北两部分,长城以北为干旱风沙草原滩地半荒漠景观,长城以南为半干旱草原—森林草原地带,地貌上表现为黄土丘陵沟壑。无定河流域面积  $30\,261\text{ km}^2$ ,流域出口控制站为白家川水文站,控制流域面积  $29\,662\text{ km}^2$ 。年降水量  $409.1\text{ mm}$ ,由北向南增加,北部  $370\text{ mm}$ ,南部增为  $410\text{ mm}$ 。风沙区位于西北部,占该流域总面积的  $54.3\%$ ,侵蚀模数较低。东南部为黄土丘陵沟壑区,土壤侵蚀剧烈,面蚀、沟蚀和重力侵蚀均十分发育<sup>[11]</sup>,侵蚀产沙量介于前两者之间。无定河流域的风水两相侵蚀产沙作用对于流域的产沙过程特别是粗泥沙的产沙过程起着十分重要的作用。从 20 世纪 60 年代开始,国家在无定河流域中开展了水土流失治理工作,治理工作分为试验、推广到大面积实施 3 个阶段,规模上逐步扩大,至 20 世纪末期,实施面积已经接近流域面积的  $1/3$ ,采取的主要方式分为修建梯田、造林、种草和修建淤地坝<sup>[12]</sup>,在控制土壤水土流失上的作用是显著的<sup>[13]</sup>。在水土保持实施的同时,降雨和风沙活动也有明显减少<sup>[14]</sup>,任何一个方面在粗泥沙减少上所起的作用都不可忽视,但是在界定这几个因素对粗泥沙影响强弱方面存在极大困难。

## 2 资料来源及研究方法

本研究主要利用出口控制站白家川水文站的资

料,研究全流域粗泥沙产沙模数的变化及其与影响因素的关系。为了对粗泥沙侵蚀产沙的变化进行研究,以全沙输沙量和粒径 $>0.05$  mm 粗泥沙的产沙模数为指标。研究中所涉及到的水文、泥沙和降水资料的年份为 1964—1996 年。依据全流域 90 个雨量站的资料,求出了全流域面积平均的降雨量特征值,包括汛期(6—9 月)降雨量  $P_{6-9}$  (mm),最大 1 d 降雨量  $P_1$  (mm),最大 30 d 累计降雨量  $P_{30}$  (mm)作为水力指标来表达降水对侵蚀产沙的影响。利用国家气象局在无定河及其周边 14 个气象站点的资料,以沙尘暴频率(即每年出现沙尘暴天气的天数,d/a)和 $\geq 5\text{ m/s}$ 的年起沙风日数(d/a)和 4 月份平均风速(m/s)代表风力作用的强度及其后果,研究涉及到 1964—1996 年间历年的全流域梯田、造林、种草和淤地坝淤成的坝地等水土保持措施实施面积数据均来自文献<sup>[13]</sup>。

根据以上站点资料,采用 ArcGIS 9.2 中 Kriging 方法逐年插值后,以流域边界提取出各流域逐年的风力和水力指标的面上平均值。将处理后的数据导入 SPSS 中进行相关及偏相关分析,确定全沙输沙量和粗沙比的影响因素,然后进行多元回归,利用回归系数界定法确定各影响因素的贡献度。

粗泥沙输沙量( $Q_{CS}$ )是全沙输沙量( $Q_S$ )与粗泥沙在全沙中所占比例( $P_{S\geq 0.05}$ )的乘积。

$$Q_{CS} = Q_S \times P_{S\geq 0.05}$$

为了掌握粗泥沙输沙量与各个影响因素之间的关系,必须掌握全沙输沙量和粗泥沙在全沙中所占的比例(粗沙比)与各影响因素之间的关系。因此,首先对全沙输沙量、粗沙比和各个影响因素进行了相关分析。在确定了它们之间的大致关系后,利用偏相关分析进行了验证,偏相关系数是在对其他变量的影响进行控制的条件下,衡量多个变量中某两个变量之间的线性相关程度的指标。所以,用偏相关系数来描述两个变量之间的内在线性联系会更合理,更可靠。在计算偏相关系数时,需要掌握多个变量的数据,一方面考虑多个变量之间可能产生的影响,另一方面又采用一定的方法控制其他变量,专门考察两个特定变量的净相关关系。在多变量相关的场合,由于变量之间存在错综复杂的关系,因此偏相关系数与简单相关系数在数值上可能相差很大,有时甚至符号都可能相反。偏相关系数的取值与简单相关系数一样,相关系数绝对值愈大(愈接近 1),表明变量之间的线性相关程度愈高;相关系数绝对值愈小,表明变量之间的线性相关程度愈低。

由于输沙量和粗沙比与影响因素之间在时间上存在一定的同步效应,为了区分各影响因素的贡献,

本研究采用了回归系数决定法。在计算各影响因素对输沙量的贡献时,以白家川站年输沙模数( $Q$ )为因变量,以降雨量( $P$ )和水土保持面积( $A_{\text{tfgc}}$ )作为自变量建立回归方程式:

$$Q = a + bP + cA_{\text{tfgc}}$$

由于各变量的数量级相差很大(表 3),不能直接根据回归系数( $b$ 和 $c$ )的大小来判定各变量贡献的大小。对各变量的数据进行了标准化,使之变化在 0~1 之间,然后重新进行回归计算,得到常数项为 0 的回归方程为:

$$Q = bP + cA_{\text{tfgc}}$$

式中:回归系数  $b$  和  $c$  绝对值(表 3)的大小可以反映其变化对自变量贡献率的大小,由此可以求出降雨对  $Q$  的贡献率  $C_P$  和水土保持对  $Q$  贡献率  $C_A$ 。由于降雨指标中汛期降雨量与输沙模数的相关系数最高,因此这里的  $P$  值仅用汛期降雨量  $P_{6-9}$  作为代表。 $C_P$  和  $C_A$  的计算公式分别为:

$$C_P = c / (c + d); C_A = d / (c + d)$$

不同影响因素对粗沙比的贡献采用相同方法求取。

### 3 结果与分析

#### 3.1 粗泥沙输沙量变化的原因分析

粗泥沙输沙量的多少一方面取决于全沙输沙量的多寡,另一方面取决于粗泥沙在其中所占的比例,因此在分析时应分别看待,将它们分别与影响因素做相关分析及偏相关分析,以确定各影响因素在其中所起的作用。

3.1.1 粗泥沙变化与影响因素的相关分析 通过对 1964—1996 年的以年为时段的风力指标、水力指标和水土保持面积与全沙输沙量和粗泥沙比例的相关分析表明,水土保持措施实施面积与全沙输沙量以及粗沙比都呈明显的负相关关系;降雨与全沙输沙量呈显著正相关关系,而与粗沙比例相关性不明显;风沙活动与之相反,与全沙输沙量的相关性不显著,而与粗沙比相关性明显(表 1)。自 20 世纪 60 年代开始的水土保持工作改变了泥沙的侵蚀、输移和沉积过程,梯田、水地、造林和种草通过改变减少坡地的侵蚀源来减少入黄泥沙的量和粗粒部分,坝地主要起到了拦粗排细的作用。随着水土保持面积的增大,输沙量和粗泥沙百分比会随之减少,水土保持措施在输沙量和粗泥沙比例的控制上具有双重作用。而降雨的减少主要使得侵蚀产沙量减少,风沙活动的减少降低了粗泥沙比例。本研究考察的只是近几十年的变化,但风力作用自第三纪就已开始,尤其是第四纪积累了丰富的可侵蚀风力沉积物<sup>[13]</sup>,现代风沙活动已经在流域内部发生,通过蠕移、跃移和河岸崩塌等方式提供

更多的粗粒部分,现今研究区的侵蚀产沙是地质时期堆积的风成物与现代风沙活动复合的结果,降雨作用是从表层开始,那么离降雨时刻越近,风力沉积物越容易被流水侵蚀,因此,现代风沙活动越剧烈,产生的粗泥沙就会越多,但总的输沙量还是由作为直接推动力的径流所决定。

表 1 各泥沙指标与影响因素的相关性

影响因素	输沙模数	显著性水平	粗沙比	显著性水平
梯田	-0.439	0.011	-0.699	0.001
坝地	-0.508	0.003	-0.713	0.001
水地	-0.479	0.005	-0.586	0.001
造林	-0.359	0.040	-0.774	0.001
种草	-0.455	0.008	-0.751	0.001
最大 1 d 降雨量	0.617	0.001	0.162	0.369
最大 30 d 降雨量	0.594	0.001	0.047	0.794
汛期降雨量	0.574	0.001	0.052	0.772
年降雨量	0.559	0.001	-0.032	0.858
沙尘暴	0.198	0.268	0.639	0.001
4 月份平均风速	0.160	0.374	0.65	0.001
冬半年起沙风日数	0.281	0.113	0.598	0.001

3.1.2 粗泥沙变化与影响因素的偏相关分析 由于几个过程具有一定的同步效应,为了确定某一要素在输沙量和粗沙比上是否具有实际作用,这里以输沙量和粗沙比作为应变量,与代表水力指标的汛期降雨量、代表风力指标的年沙尘暴日数和累加出的各项水土保持措施的总面积进行偏相关分析。

从偏相关计算结果(表 2)来看,水土保持总面积和汛期降雨量与输沙模数的偏相关系数都较高,达到了 0.001 的显著水平;而粗沙比方面,风力指标的偏相关系数达到 0.001 的显著水平,水土保持面积的偏相关系数达到了 0.05 的显著水平。以降雨量作为控制变量时,水土保持与输沙模数仍表现出负相关,而以水土保持作为控制变量时,沙尘暴与输沙量间的相关性表现仍很差;另一方面,以沙尘暴作为控制变量时,水土保持与粗沙比依然具有负相关关系,而以水土保持作为控制变量时,汛期降雨量与粗沙比的相关也不明显。也就是说在排除降雨量和风沙活动影响的情况下,水土保持措施的实施在控制全沙输沙量及粗沙比上都具有实际意义。

表 2 输沙模数、粗沙比与影响因素的偏相关系数

影响因素	输沙模数	显著性水平	粗沙比	显著性水平
水土保持总面积	-0.377	0.033	-0.575	0.001
汛期降雨量	0.595	0.001		
沙尘暴			0.630	0.001

### 3.2 粗泥沙与影响因素的多元回归分析

分析结果表明,影响全沙输沙量的主要因素是降雨量和水土保持措施,而影响粗沙比的是风沙活动和水土保持措施,因此对全沙输沙模数和粗沙比与它们的主要影响因素分别做二元回归分析,以此判断各影响因素贡献度的大小。

3.2.1 输沙模数的多元回归分析 以白家川站年输沙模数( $Q$ )为因变量,以降雨量( $P$ )和水土保持面积( $A_{\text{tfgc}}$ )作为自变量建立回归方程式:

$$Q_S = -0.513A_{\text{tfgc}} + 0.528P_{6-9} \quad (5)$$

从回归结果可以看到(表 3),汛期降雨量和水土保持面积与输沙模数的复相关系数值为 0.77,显著性概率达到了 0.001,说明此回归是可信的。贡献率结果(表 3)显示,水土保持对输沙模数的贡献率 49%,汛期降雨量的贡献率 51%,两影响因素对侵蚀产沙的影响程度十分相近。

表 3 输沙模数  $Q$  与水土保持面积  $A_{\text{tfgc}}$  和降雨量  $P_{6-9}$  回归分析

项目	数据标准化前	数据标准化后	T 检验结果	显著性概率水平	各变量的贡献度/%
常数项	633.767	—	0.330	0.745	—
$A_{\text{tfgc}}$ 系数	-0.945	-0.513	-3.838	0.001	49
$P_{6-9}$ 系数	21.751	0.528	3.954	0.001	51

注:复相关系数  $R^2=0.77$ ;  $F$  检验的结果  $F=16.758$ ; 显著性概率  $p=0.001$ ; 标准均方误  $E=0.1923$ 。

3.2.2 粗沙比的多元回归分析 利用与估算影响要素对输沙模数贡献度相同的方法分析粗沙比。先对粗沙比( $P_{s>0.05}$ )做多元回归,应变量为粗沙比,自变量为水土保持面积  $A_{\text{tfgc}}$  和年沙尘暴日数( $D_{\text{ss}}$ )。回归结果显示,复相关系数值为 0.699,虽低于输沙模数的,也同样能通过 0.001 的显著性检验。水土保持对粗泥沙比例减少的贡献率为 56%,略高于沙尘暴减少所贡献的 44%(表 4)。

$$\text{回归方程: } P_{s>0.05} = -0.418A_{\text{tfgc}} + 0.329D_{\text{ss}} \quad (6)$$

表 4 粗沙比  $P_{s>0.05}$  与水土保持面积  $A_{\text{tfgc}}$  和年沙尘暴日数  $D_{\text{ss}}$  的回归结果

项目	数据标准化前	数据标准化后	T 检验结果	显著性水平	贡献度/%
常数项	39.056	—	5.874	0.001	—
$A_{\text{tfgc}}$ 系数	-1.792E-03	-0.418	-1.853	0.021	56
$D_{\text{ss}}$ 系数	1.135	0.329	1.461	0.011	44

注:复相关系数  $R=0.699$ ;  $F$  检验的结果  $F=10.988$ ; 显著性概率  $p=0.001$ ; 标准均方误  $E=6.6490$ 。

## 4 结论

通过对无定河水土保持措施和风水两相作用对流域粗泥沙侵蚀产沙的影响分析发现,降雨的减少主要影响着侵蚀产沙量,而对粗沙比的影响较小,风力作用与之相反,近期的风沙活动减少使得粗泥沙比例部分的降低,对全沙输沙量的影响较小;水土保持措施对全沙产沙量和粗沙比都具有控制作用。通过多元回归分析区别风力、水力和人类活动所起到的作用大小,就全沙产沙量而言,降雨变化和水土保持的贡献几乎相等;而粗沙比方面,水土保持措施降低粗沙比的作用稍大于沙尘暴减少所起作用。由于风沙活动的减少导致了粗泥沙比例的部分降低,但这可能是暂时的,一旦气候转向干冷,风沙活动会再次活跃,因此,对于长期忽视的风沙活动对黄河泥沙的影响应该受到足够的重视,采取有效措施控制、预防风沙活动,尤其是控制  $>0.05 \text{ mm}$  粗颗粒物质的东移。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 许炯心. 风水两相作用对黄河流域高含沙水流的影响[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35(9): 899-906.
- [2] 许炯心. 黄河中游风水两相作用对侵蚀产沙地域分布的影响[J]. 自然科学进展, 2007, 17(1): 49-56.
- [3] Yu Liansheng. The Huanghe (Yellow) River: Recent changes and its countermeasures[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17/18): 2281-2298.
- [4] Shi Changxing. Causes for continuous siltation of the lower Yellow River[J]. Geomorphology, 2005, 68(3/4): 213-223.
- [5] 陈江南, 姚文艺, 李勉, 等. 无定河流域水土保持措施配置及减沙效益分析[J]. 中国水土保持, 2006(8): 24-25.
- [6] 师长兴, 郭立鹏. 无定河坡面措施减沙和拦粗泥沙量分析[J]. 泥沙研究, 2006(5): 22-27.
- [7] 高鹏, 穆兴民, 李锐, 等. 黄河支流无定河水沙变化趋势及其驱动因素[J]. 泥沙研究, 2009(5): 22-28.
- [8] 王随继, 冉立山. 无定河流域产沙量变化的淤地坝效应分析[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 811-818.
- [9] 许炯心, 孙季. 无定河水土保持措施减沙效益的临界现象及其意义[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 610-615.
- [10] 许炯心, 孙季. 无定河淤地坝拦沙措施时间变化的分析与对策[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 26-30.
- [11] 王随继. 无定河流域不同地貌区水沙过程对比[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 508-517.
- [12] 冀文慧, 汪岗, 范昭, 等. 黄河水沙变化研究[M]. 河南郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [13] 张胜利. 略论黄河中游水沙变化及水土保持减沙效益[J]. 水土保持通报, 1994, 14(3): 8-11.
- [14] 李静, 刘志红, 李锐. 黄土高原不同地貌类型区降雨侵蚀力时空特征研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 124-127.